东北三省地区生长季旱涝对春玉米产量的影响

王蔚丹[1,2], 孙　丽[1,2], 裴志远[1,2], 马尚杰[1,2],
陈媛媛[1,2], 孙娟英[1,2], 董　沫[1,2]

（1. 农业农村部耕地利用遥感重点实验室,北京 100121；2. 农业农村部规划设计研究院,北京 100121）

摘　要：评估生长季旱涝对作物产量的影响有助于农民采取措施增产保收。本研究基于1988—2017年气象站点数据和灾情、产量等统计数据，以中国东北三省为研究区，通过对比多时间尺度指标——标准化降水指数（SPI）和标准化降水蒸散指数（SPEI）与旱涝受灾率的关系，选择优势指数表征东北春玉米生长季干湿状况，基于HP滤波构建相对气象产量，利用距离相关分析方法选取合理时间尺度和关键月份的指数，分析这些指数与春玉米相对气象产量的关系以及不同生育阶段水分条件与产量之间的关系。结果表明：（1）SPI、SPEI均能表征东北地区农作物受旱和受涝状况，整体上SPEI在表征东北地区旱涝时更具优越性，尤其在辽宁省，因旱受灾率与SPI和SPEI相关系数差距明显，因涝受灾率与SPEI相关系数最大值为0.54，与SPI相关性不显著。（2）辽宁省$SPEI_3$-8与相对气象产量的距离相关系数最大，吉林省和黑龙江省$SPEI_6$-8与相对气象产量的距离相关系数最大；各省对应的SPEI与相对气象产量呈向下的抛物线趋势，其中辽宁省春玉米产量受干旱和雨涝的共同影响，吉林、黑龙江两省主要受干旱灾害的影响。（3）辽宁省春玉米在拔节—抽穗期主要受干旱影响，生长季后期受洪涝灾害影响较前期加重；当SPEI为1.0左右时，吉林省春玉米在出苗—拔节、拔节—抽穗期可达到最高产，抽穗—乳熟期受干旱影响严重；黑龙江关键生育期主要受旱灾影响，在出苗—拔节、拔节—抽穗期正常偏湿年份可达到最高产量，但中度及以上雨涝仍会导致玉米减产，抽穗—乳熟期在轻度湿润时可高产，重度湿润时会因涝减产。本研究对东北三省地区预估旱涝灾害对春玉米产量影响和及时采取灾害防御措施具有一定的参考价值。

关键词：干旱；洪涝；标准化降水指数SPI；标准化降水蒸散指数SPEI；产量；春玉米；东北三省

中图分类号：S166　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202106-SA004

引用格式：王蔚丹, 孙丽, 裴志远, 马尚杰, 陈媛媛, 孙娟英, 董沫. 东北三省地区生长季旱涝对春玉米产量的影响[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(2): 126-137.

WANG Weidan, SUN Li, PEI Zhiyuan, MA Shangjie, CHEN Yuanyuan, SUN Juanying, DONG Mo. Effect of growing season drought and flood on yield of spring maize in three northeast provinces of China[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(2): 126-137. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

旱涝灾害是影响农业生产较为严重的自然灾害，直接威胁粮食安全。气候变化正导致极端天气事件的强度和频率上升，尤其是干旱和洪涝[1]。《2020年全球粮食危机报告》（GRFC 2020）指出干旱和洪水等极端天气是严重粮食不安全的重要驱动因素之一[2]。东北三省是中国玉

收稿日期：2021-06-01　修订日期：2021-06-28

基金项目：国家重点研发计划（2016YFB0501505）

作者简介：王蔚丹（1985—），女，博士，研究方向为农业干旱监测及自然灾害风险分析。Email：wangwd52@mail.bnu.edu.cn。

*通讯作者：孙　丽（1978—），女，高级工程师，研究方向为农业遥感监测。电话：010-59197153。Email：sunli0618@163.com。

米等重要粮食作物的生产基地之一，该地区素有“黄金玉米带”之称，玉米产量占全国产量的30%左右。受全球气候变暖影响，旱涝灾害呈“广发、频发”态势，对玉米产量和市场稳定供给造成威胁。探究和揭示春玉米不同生育阶段干湿状况与产量之间的关系，对预估旱涝对春玉米产量影响和及时采取灾害防御措施均具有重要意义。

干旱通常被认为是一个缓慢的过程，多以季或年尺度进行评估，但在农业领域，作物关键生育阶段发生短时干旱也能造成重大影响[3]。干旱具有多时间尺度的特性[4,5]。标准化降水指数（Standardized Precipitation Index，SPI）和标准化降水蒸散指数（Standardized Precipitation Evapotranspiration Index，SPEI）是常用的多时间尺度指数。Vicente等[5]提出SPEI指数时，选用了较为简单的Thornthwaite模型计算潜在蒸散。沈国强等[6]验证基于Penman-Monteith模型的SPEI指数在东北地区应用的有效性，认为其在定量化研究方面具有较好的适用性。许多研究者用多时间尺度指数研究东北地区的干旱时空分布特征[6-9]、干旱风险的空间格局等[10,11]，为区域水资源管理与规划、农业生产与生态系统保护等提供科学依据。也有部分研究者利用多时间尺度干旱指数评价干旱与产量的关系[12-14]。针对东北春玉米作物，刘维等[15]利用9月份6个月尺度的SPI表征辽宁、吉林、黑龙江和内蒙古东部春玉米全生育期干旱，分析SPI对产量的影响，但该研究未考虑由于区域差异，与产量波动有较强相关关系的指数的时间尺度和监测时段也可能不同。杨晓晨等[16]以3个月时间尺度SPEI表征春玉米不同生育阶段干旱情况，选择与气候产量相关性最高的生育阶段分析SPEI与产量之间的关系，但结果不甚理想，且未详细分析春玉米各个生育阶段干旱对最终产量的影响。韩冬荟等[17]用特定月份、特定时间尺度的SPEI表征不同时节的水分状况对主要粮食作物产量的影响，侧重于对比不同地区不同作物分别对SPEI的响应及其敏感性。SPI和SPEI不仅能表征干旱情况，亦能指示洪涝灾害[18]，Ayugi等[19]利用SPEI对肯尼亚的气象干旱和洪水情景进行了评估；Du等[20]验证了SPI在旱涝监测方面的适用性和有效性。东北地区雨热同期的特点突出，农业生产不仅受干旱的威胁，雨涝也是主要气象灾害之一。李秀芬等[21]选取SPI为旱涝判识指数，分析了黑龙江省大豆生长季旱涝的时序特征，以及旱涝对大豆不同生育阶段产量的影响。任宗悦等[22]对1958—2017年东北地区春玉米旱涝趋势的演变进行研究，指出春玉米干旱的发生频率高于洪涝的发生频率，但前3个生育阶段水分盈余情况呈加重趋势。可以看出，SPI和SPEI两个指数具有多时间尺度特征，既可以表征干旱，也可以表征湿润或洪涝。

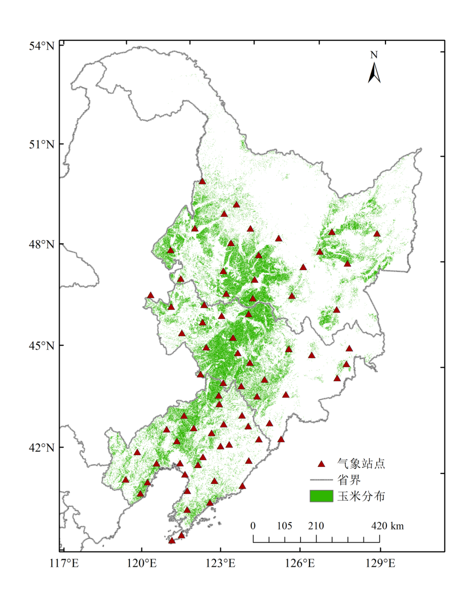
东北地区旱涝皆有发生，但目前研究侧重于利用多时间尺度指数进行干旱监测评估，且多以特定月份特定时间尺度的指数表征生育期干旱，研究生育期内最能表征东北三省旱涝对春玉米产量影响的对应月份和时间尺度的指数，解析不同生育阶段旱涝与春玉米产量的关系，可以定量评估旱涝灾害对春玉米产量的影响，进而合理安排实施各项措施。本研究计算东北三省1988—2017年SPI和SPEI指数，优选更能表征生育期内旱涝情况的多时间尺度指数，结合距离相关分析方法，研究各省与春玉米产量波动有较强相关关系的时间尺度和月份的指数，分析其与春玉米产量波动的关系；同时，分析不同生育阶段的干湿状况对春玉米产量的影响，以期为东北地区春玉米安全生产和灾害防御管理等提供科学依据。

2 材料和方法

2.1 研究区概况

以东北三省（辽宁省、吉林省和黑龙江省）为研究区，区域内夏季温和湿润，冬季严寒漫长，无霜期160～200 d，年降水量为400～1000 mm，年均温度为-3～10℃，属于温带大陆性季风气候[16]。东北三省春玉米主要分布如图1所示。由

于雨热同期，在春玉米生育期内较易发生旱涝灾害，其影响不容忽视。2017年，黑吉辽三省农作物旱涝受灾面积约5.73×104 hm^2，占农作物总受灾面积的86.2%[21]。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号标准地图制作，底图边界无修改

图1 东北三省气象站点及春玉米空间分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and maize in three northeastern provinces of China

2.2 数据来源及处理

玉米空间分布数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所董金玮团队发布的基于Sentinel-2数据的2017年中国东北地区作物类型图（https：//figshare. com/articles/figure/The_10-m_crop_type_maps_in_Northeast_China_during_2017-2019/13090442/1）。气象数据源自中国气象数据网“中国地面气候资料日值数据集（V3.0）”（http：//data. cma. cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html），该数据集已经过严格的质量控制。根据作物类型图，选取东北三省玉米分布区内具有较完整时间序列的台站75个（图1），数据时间为1988—2017年。将逐日气象资料进行处理得到月尺度累积降水量、最高气温、最低气温、2 m高度平均风速、日照时数、相对湿度等数据。东北三省春玉米单产、种植面积、农作物受灾面积等统计数据来源于中国国家统计局、中国国家粮食局和农业农村部种植业管理司，统计时间为1988—2017年。由于每年春玉米种植面积不同，为便于比较干旱和洪涝灾害造成的危害程度，使用农作物因旱受灾面积与种植面积比值表示因旱受灾率，洪涝受灾面积与种植面积比值表示因涝受灾率。

2.3 研究方法

2.3.1 多时间尺度指数

SPI和SPEI两个指数具有较强的数学统计机理，可反映多时间尺度的旱涝，且易于实现，被广泛应用。SPI仅考虑降水数据，具体计算方法见文献［4］，本研究采用Gamma函数拟合降雨时间序列。SPEI是SPI的补充，考虑了水量平衡，本研究利用FAO推荐的Penman-Monteith蒸散模型计算SPEI指数，逐月潜在蒸散量（ET_0）计算方法如公式（1）所示。进而计算逐月降水量与潜在蒸散量的差值，对累计概率密度进行正态标准化求得SPEI，具体计算方法参见文献［5］。SPI和SPEI对应的旱涝等级划分标准见表1。其中，指数值越小表示越干旱，反之越湿润。本研究对研究区1988—2017年4月—9月份各月1～6个月的时间尺度计算SPI和SPEI，其中，得到的指数分别记为SPIn-M和SPEIn-M，n表示时间尺度，M表示月份。如SPEI$_5$-9表示9月份5个月时间尺度的SPEI值。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

其中，ET_0为潜在蒸散量，mm；Δ为温度随饱和水汽压变化的斜率，kPa/°C；U_2为离地2 m高处风速，m/s；e_a为空气饱和水汽压，kPa；e_d为空气实际水汽压，kPa；T为平稳气温，°C；γ为湿度表常数，kPa/°C；R_n为到达地面的净辐射，MJ/（m^2·d）；G为土壤热通量密度，MJ/（m^2·d）。

表1 SPI和SPEI对应的旱涝等级划分标准[14,21]

Table 1 Classification of moisture categories based on SPI and SPEI[14,21]

指数值	旱涝等级
≥2.00	极端湿润
1.50～2.00	严重湿润
1.00～1.50	中度湿润
0.50～1.00	轻度湿润
-0.50～0.50	正常年份
-1.0～-0.5	轻度干旱
-1.5～-1.0	中度干旱
-2.0～-1.5	严重干旱
≤-2.0	极端干旱

参照文献［22］和［23］，确定东北地区春玉米全生育期为4—9月，划分为播种—出苗（4、5月）、出苗—拔节（5、6月）、拔节—抽穗（6、7月）、抽穗—乳熟（7、8月）和乳熟—成熟（8、9月）5个生育阶段。

2.3.2 相对气象产量

作物产量不仅受自然因素的影响，还受到品种改良、管理方式改善、种植制度改变等社会因素以及随机误差的影响。作物统计产量一般包括趋势产量、气候波动产量和随机产量。趋势产量是指生产中社会生产力的发展，而气候波动产量是气候波动的贡献（主要是气象灾害）[24]。许多研究者为了研究气候波动与作物产量之间的关系一般将随机“噪声”略去，对趋势产量进行分离[25-27]。本研究利用相对气象产量来表示气候波动对春玉米产量的影响。

$$Y_{i} = Y_{iq} + Y_{ir} \tag{2}$$

$$Y_{it} = \frac{Y_{iq}}{Y_{ir}} \tag{3}$$

其中，Y_i为统计产量，kg/hm²；Y_{iq}为气象产量，kg/hm²；Y_{ir}为趋势产量，kg/hm²，由实际产量序列拟合方程得出；Y_{it}表示相对气象产量。

本研究采用HP滤波方法模拟春玉米产量趋势，具体计算方法参照文献［28］。

2.3.3 相关分析

Pearson相关分析是最常用的相关分析方法，利用该方法研究SPI、SPEI与因旱受灾率、因涝受灾率的关系。由于Pearson相关分析只能度量数据间的线性相关程度，而SPEI与春玉米产量的关系不一定是线性的，故不能直接用Pearson相关分析研究二者之间的关系。距离相关系数能在很大程度上克服Pearson相关系数的弱点[29]，并且不需要任何的模型假设和参数条件。本研究选用距离相关系数来度量不同月份和时间尺度的SPEI与产量波动之间的关系。其计算方法[30]如下：

$$\hat{d}corr(u,v) = \frac{\hat{d}cov(u,v)}{\sqrt{\hat{d}cov(u,u)\hat{d}cov(v,v)}} \tag{4}$$

其中，$\hat{d}corr^2(u,v) = \widehat{S_1} + \widehat{S_2} - 2\widehat{S_3}$，$\widehat{S_1}$、$\widehat{S_2}$和$\widehat{S_3}$分别为：

$$\widehat{S_1} = \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left\|u_i - u_j\right\|_{d_u}\left\|v_i - v_j\right\|_{d_v} \tag{5}$$

$$\widehat{S_2} = \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left\|u_i - u_j\right\|_{d_u}\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left\|v_i - v_j\right\|_{d_v} \tag{6}$$

$$\widehat{S_3} = \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\left\|u_i - u_l\right\|_{d_u}\left\|v_j - v_l\right\|_{d_v} \tag{7}$$

同理计算$\hat{d}cov(u,u)$和$\hat{d}cov(v,v)$。其中，u和v是进行相关分析的两个参量，n表示样本个数。

3 结果与分析

3.1 SPI、SPEI与因旱受灾率、因涝受灾率的关系

利用Pearson相关分析法计算各省农作物因旱受灾率与春玉米生育期内各月份1～6个月时间尺度SPI、SPEI的相关系数（表2），其中4月份均未通过0.05显著性检验，因此未列出。结果显示，辽宁省因旱受灾率与SPI、SPEI相关系数最小值分别为-0.46、-0.76，差距明显；黑龙江省指标差距最小，分别为-0.52、-0.53。随着纬度位置北移，SPI、SPEI对因旱受灾率表征的差异逐渐减小，但整体上仍表现为SPEI指数与因旱受灾率相关性更强。因旱受灾率与SPEI的相关

性在各个省份之间存在差异，同一月份、同一时间尺度的SPEI对比，以SPEI$_2$-8为例，与辽宁省、吉林省和黑龙江省与因旱受灾率的相关系数分别为−0.65、−0.46和−0.40，综合来看，相关性最强的是辽宁省，其次为吉林省，黑龙江省相关性最弱。

表2 SPI、SPEI与农作物因旱受灾率之间的相关性

Table 2 Correlation between multi-scale drought index and the rate of crop drought disaster

省份	时间尺度	5月		6月		7月		8月		9月	
		SPEI	SPI	SPEI	SPI	SPEI	SPI	SPEI	SPI	SPEI	SPI
辽宁	1	−0.34	−0.23	−0.41*	−0.19	−0.53**	−0.22	−0.48**	−0.11	−0.28	−0.21
	2	−0.44*	−0.27	−0.54**	−0.31	−0.61**	−0.28	−0.65**	−0.23	−0.54**	−0.24
	3	—	—	−0.56**	−0.32	−0.65**	−0.40*	−0.75**	−0.28	−0.65**	−0.33
	4	—	—	—	—	−0.67**	−0.41*	−0.75**	−0.39*	−0.75**	−0.33
	5	—	—	—	—	—	—	−0.76**	−0.41*	−0.74**	−0.43*
	6	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.75**	−0.46**
吉林	1	−0.13	−0.19	−0.47**	−0.39*	−0.37*	−0.23	−0.29	−0.15	−0.02	−0.24
	2	−0.25	−0.26	−0.53**	−0.48**	−0.55**	−0.41*	−0.46**	−0.28	−0.26	−0.29
	3	—	—	−0.55**	−0.50**	−0.61**	−0.53**	−0.67**	−0.42*	−0.41*	−0.39*
	4	—	—	—	—	−0.60**	−0.55**	−0.69**	−0.53**	−0.58**	−0.46**
	5	—	—	—	—	—	—	−0.68**	−0.55**	−0.60**	−0.56**
	6	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.60**	−0.59**
黑龙江	1	−0.26	−0.37*	−0.27	−0.23	−0.29	−0.23	−0.27	−0.21	−0.14	−0.06
	2	−0.31	−0.41*	−0.40*	−0.43*	−0.32	−0.29	−0.40*	−0.34	−0.30	−0.25
	3	—	—	−0.40*	−0.43*	−0.43*	−0.44*	−0.41*	−0.37*	−0.39*	−0.35
	4	—	—	—	—	−0.43*	−0.45*	−0.53**	−0.51**	−0.38*	−0.36*
	5	—	—	—	—	—	—	−0.53**	−0.52**	−0.49**	−0.47**
	6	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.50**	−0.49**

注：P<0.05（*），P<0.01（**），下同。为简化表内容，在不影响分析SPI、SPEI与因旱受灾率关系的情况下，部分数据未列出，用“—”表示

计算各省因涝受灾率与各月份1～6个月时间尺度SPI、SPEI的相关系数（表3）。其中4、5、6月份均未通过0.05显著性检验，因此未列出。7、8、9月1～6个月时间尺度指数与各省因涝受灾率呈正相关关系。辽宁省因涝受灾率与SPEI相关系数最大值为0.54，与SPI相关性均不显著，吉林省和黑龙江省的因涝受灾率与SPI、SPEI相关系数最大值分别为0.48、0.54和0.65、0.69，SPEI更能反映三省的农作物受涝情况。SPI、SPEI与因旱受灾率、因涝受灾率的关系分析表明，SPI、SPEI能够表征东北地区农作物的受旱和受涝情况，但SPEI更具优越性，因此选择SPEI作为旱涝表征指标，进一步分析各省因旱受灾率和因涝受灾率对SPEI的响应以及旱涝状况对春玉米产量的影响。

结果表明，辽宁省因旱受灾率与SPEI$_5$-8最相关，因涝受灾率与SPEI$_2$-8最相关，吉林省和黑龙江省因旱受灾率与SPEI$_4$-8最相关（因表2中小数点后保留2位，黑龙江SPEI$_5$-8与因旱受灾率相关系数与SPEI$_4$-8相同），因涝受灾率与SPEI$_3$-9最相关。基于此，分析三省受灾率与SPEI之间的关系（图2），可以看出，三省因旱受灾率普遍大于因涝受灾率，因旱受灾率随SPEI的增大而减小，因涝受灾率则随着SPEI的增大而增大。当上述省份相应月份及时间尺度的SPEI<−0.2时，三省的因旱受灾率普遍大于30%，相应月份及时间尺度的SPEI>1.3时，三省的因涝受灾率普遍大于15%。

表3 SPI、SPEI与农作物因涝受灾率之间的相关性

Table 3 Correlation between multi-scale drought index and the rate of crop waterlog disaster

省份	时间尺度	7月		8月		9月	
		SPEI	SPI	SPEI	SPI	SPEI	SPI
辽宁	1	0.28	0.24	0.53**	0.11	0.19	0.12
	2	0.16	0.04	0.54**	0.25	0.53**	0.21
	3	0.23	0.12	0.46**	0.1	0.51**	0.29
	4	0.17	0.08	0.46**	0.17	0.45*	0.15
	5	—	—	0.41*	0.14	0.45*	0.21
	6	—	—	—	—	0.40*	0.18
吉林	1	0.36*	0.26	0.25	0.19	0.31	0.33
	2	0.32	0.27	0.48**	0.38*	0.37*	0.38*
	3	0.28	0.27	0.44*	0.37*	0.54**	0.48**
	4	0.23	0.24	0.39*	0.38*	0.47**	0.43*
	5	—	—	0.35	0.35	0.42*	0.44*
	6	—	—	—	—	0.38*	0.43*
黑龙江	1	0.59**	0.56**	0.27	0.24	0.41*	0.33*
	2	0.48**	0.52**	0.63**	0.62**	0.44*	0.37**
	3	0.42*	0.52**	0.57**	0.59**	0.69**	0.65**
	4	0.40*	0.52**	0.55**	0.6**	0.60**	0.61**
	5	—	—	0.52**	0.61**	0.59**	0.61**
	6	—	—	—	—	0.58**	0.63**

注：为简化表内容，在不影响分析SPI、SPEI与因涝受灾率关系的情况下，部分数据未列出，用"—"表示

3.2 历史旱涝和春玉米产量的关系

东北三省农作物生产以雨养农业为主，通过HP滤波方法分离后得出的相对气象产量，能在一定程度上反映当年春玉米生长季中气象条件的优劣。因此，将相对气象产量与因旱受灾率、因涝受灾率等数据进行相关分析，结果显示（表4），东北三省相对气象产量与因旱受灾率均呈极显著相关（P<0.01），气象产量与因涝受灾率在辽宁省达到0.05显著性水平，吉林省和黑龙江省不显著。这表明，本研究估计的相对气象产量能够在一定程度上反映历史旱涝影响，可以用来分析产量变化与气候要素之间的关系。

表4 东北三省相对气象产量与因旱受灾率、因涝受灾率的相关性

Table 4 Correlation between relative meteorological yield and rates of drought/ waterlog disaster in three northeastern provinces of China

省份	因旱受灾率	因涝受灾率
辽宁	−0.67 **	−0.60 *
吉林	−0.73 **	0.21 N
黑龙江	−0.50 **	−0.16 N

注：P>0.05（N），P<0.05（*），P<0.01（**）

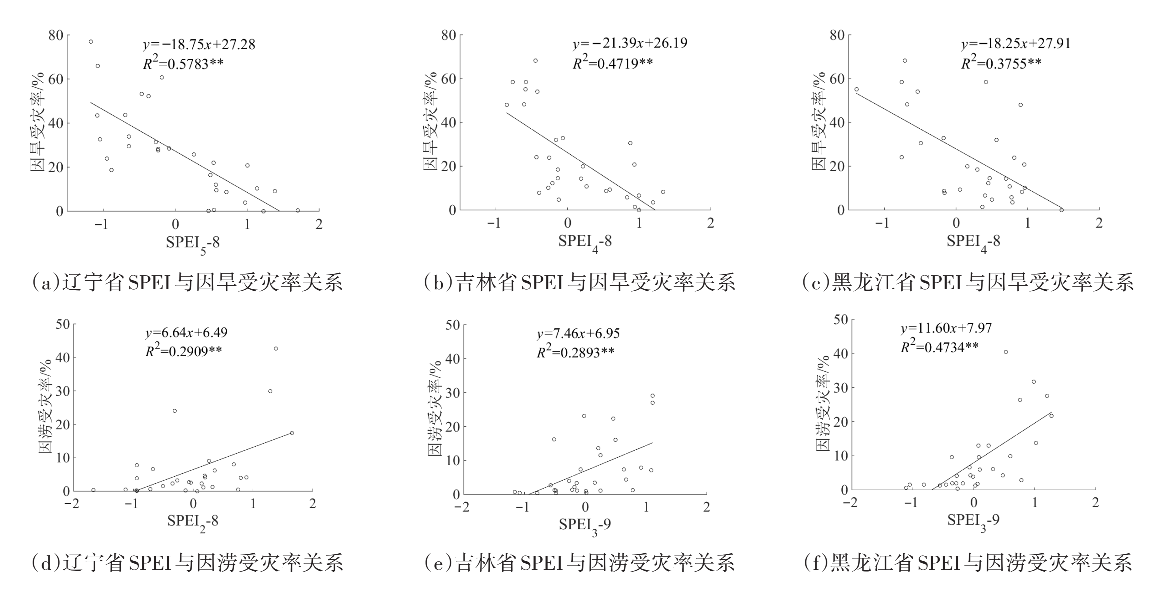


图2 东北三省SPEI与玉米受灾率的关系

Fig. 2 Relationship between SPEI and the rates of crop disaster in three northeastern provinces of China

3.3 旱涝状况对春玉米产量的影响分析

3.3.1 生育期内SPEI与春玉米产量的关系分析

选择合理时间尺度和关键月份的干旱指数分析水分状况对春玉米产量的影响。首先利用距离相关系数衡量生育期内不同月份、不同时间尺度SPEI与相对气象产量的相关性，选取与产量波动有较强相关关系的时间尺度和月份，对相对气象产量与相应的SPEI进行回归分析。结果显示，辽宁省 $SPEI_3$-8与相对气象产量距离相关系数最大，为0.49；吉林、黑龙江两省 $SPEI_6$-8与相对气象产量距离相关系数最大，为0.53和0.46。通常用3—6个月时间尺度SPEI表征作物生长季，评价干旱对产量的影响[27]。因此，选取辽宁省 $SPEI_3$-8、吉林省和黑龙江省 $SPEI_6$-8分别表征作物生长季的旱涝状况，分析水分条件对产量的影响。三省8月份相应时间尺度SPEI与春玉米相对气象产量呈现向下的抛物线关系（$y=ax^2+bx+c$，$a<0$），表现为先上升后下降趋势，表明东北春玉米产量变化受到旱、涝灾害的共同影响（图3）。三省作物生长季旱涝对春玉米产量的影响有所不同。其中，辽宁省对干湿变化更为敏感（$|a|$越大，抛物线开口越小，变化更剧烈），因旱、涝造成的减产更严重。其中黑龙江省决定系数 R^2 最小，为0.2730。参考表1旱涝等级划分标准，由图3（a），辽宁省抛物线最高值对应SPEI <0.5，表明正常年份即可高产增收，同时雨涝对产量的影响小于干旱，但也不可忽视；根据抛物线函数关系，轻旱（$SPEI_3$-8<−0.9）或中度湿润以上（$SPEI_3$-8>1.6）可能导致减产10%以上。由图3（b）和图3（c）可知，吉林省和黑龙江省的抛物线最高值对应SPEI更趋于湿润区间，在0.5～1之间，在气象条件轻度湿润的年份才能最高产，干旱对春玉米产量的影响均明显大于雨涝的影响；根据抛物线函数关系，轻旱（吉林 $SPEI_6$-8<−0.6，黑龙江 $SPEI_6$-8<−1.0）或极端湿润时（吉林 $SPEI_6$-8>2.0，黑龙江 $SPEI_6$-8>2.4）可能导致减产10%以上。

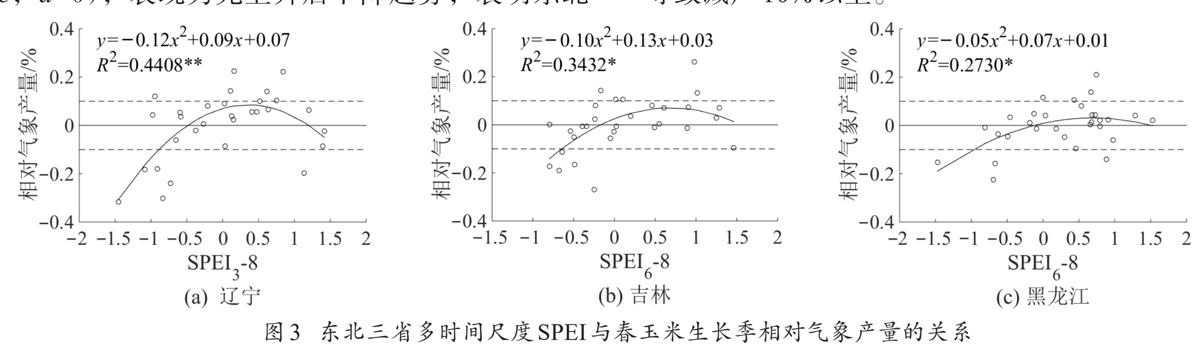


图3 东北三省多时间尺度SPEI与春玉米生长季相对气象产量的关系

Fig. 3 Relationship between SPEI and relative meteorological yield at growth stages of spring maize in three northeastern provinces of China

3.3.2 不同生育阶段SPEI与春玉米产量的关系分析

作物在不同生育阶段对水分的敏感程度不同，以 $SPEI_2$-M（M=5，6，7，8，9）表示各生育阶段的干湿状况，分析各生育阶段旱涝对春玉米产量的影响。根据回归拟合结果，选择相应的模型。三省在播种—出苗阶段均不显著，表明该生育阶段水分条件变化对春玉米产量影响不明显。

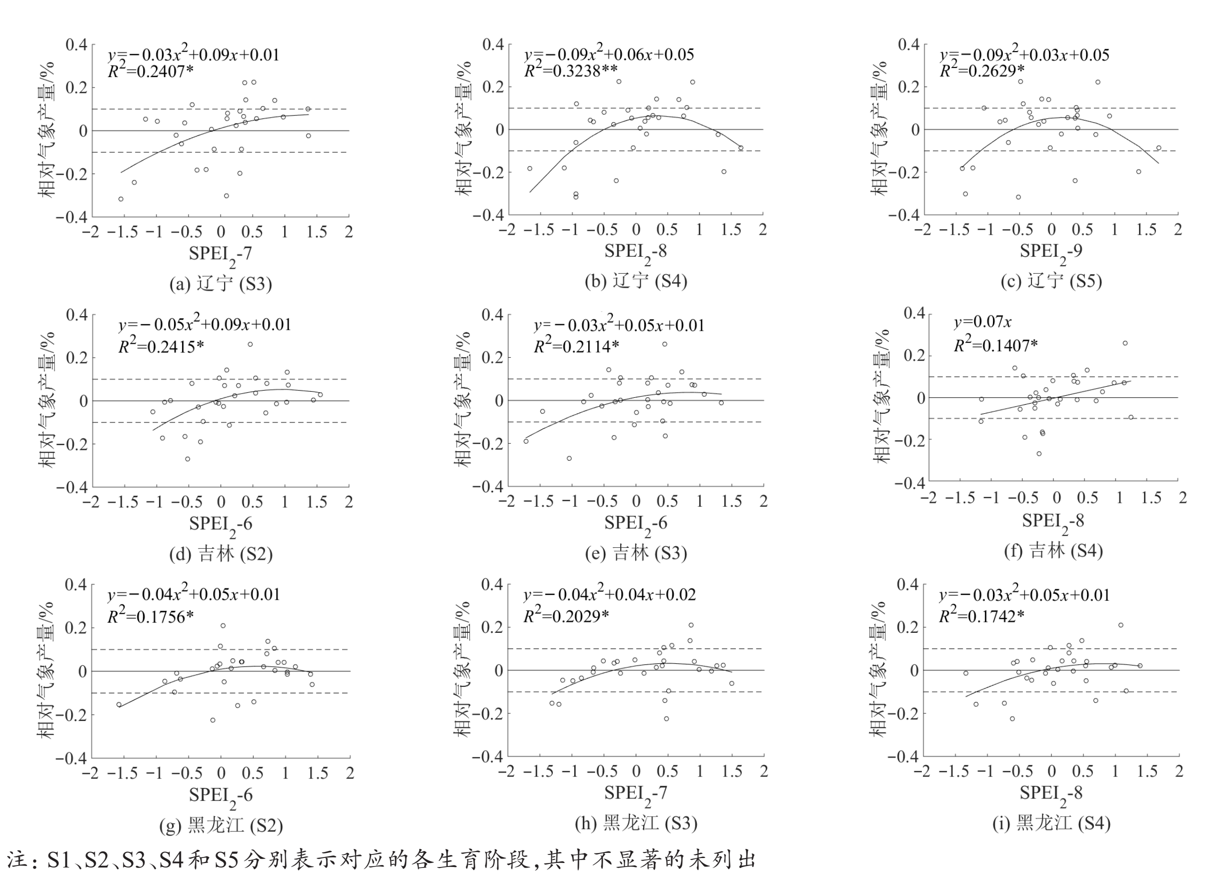
在出苗—拔节期，吉林省和黑龙江省 $SPEI_2$-6与春玉米产量的增减密切相关，春玉米相对气象产量与 $SPEI_2$-6呈现向下的抛物线关系；辽宁省 $SPEI_2$-6与春玉米产量增减的相关不显著（未列出）；该阶段吉林省抛物线最高值对应的SPEI在1.0左右（图4（d）），表明降水偏多达到中度湿润时对春玉米高产有利，干旱对春玉米产量的影响远大于雨涝的影响；黑龙江省产量主要受干旱影响，抛物线最高值对应的SPEI在0.5左右，正常偏湿年份达到最高产量，但中度及以上雨涝会导致玉米减产（图4（g））。

在拔节—抽穗期，辽宁省、吉林省和黑龙江省SPEI与相对气象产量拟合二次曲线均达到显著性水平，抛物线最高值对应的SPEI分别在1.5、1.0和0.5附近（图4（a）、（e）、（h）），表明该阶段三省主要受干旱影响，分别在接近重度湿润、中度湿润和轻度湿润时可达到最高产，也就是说，虽然该阶段三省也会出现气象过湿状态，但极少对春玉米产量产生负面影响。

在抽穗—乳熟期，辽宁省春玉米相对气象产量与$SPEI_2$-8呈现向下的抛物线关系（图4（b）），该阶段辽宁省在正常年份即可达到高产增收，但中度湿润时可能造成玉米减产；黑龙江省抛物线最高值对应的SPEI接近1.0（图4（i）），在轻度湿润时对春玉米最终产量增加有利，但轻度干旱或重度湿润时可能导致玉米减产；吉林省则呈线性关系并通过0.05显著性检验，干旱对玉米产量影响严重（图4（f））。

在乳熟—成熟期，吉林省和黑龙江省$SPEI_2$-9与玉米产量增减的相关性不显著；辽宁省相对气象产量与$SPEI_2$-9呈现向下的抛物线关系（图4（c）），抛物线最高值对应的$SPEI_2$-9值接近0，表明干旱对春玉米产量的影响稍大于雨涝，在正常偏旱或将到轻度湿润时可能造成玉米减产。

辽宁省春玉米产量在拔节—抽穗期主要受干旱影响，气候越干旱，对春玉米产量越不利，生长季后期受洪涝的影响较前期加重，旱涝均对产量有很大影响，随着春玉米生长并逐渐进入成熟期，产量对雨涝的响应越来越敏感。吉林省和黑龙江省主要受旱灾影响，尤其是吉林省，抽穗—乳熟期的SPEI与相对气象产量呈线性关系。



注：S1、S2、S3、S4和S5分别表示对应的各生育阶段，其中不显著的未列出

图4 东北三省春玉米各生育阶段SPEI与相对气象产量的关系

Fig. 4 Relationship between SPEI and relative meteorological yield at different growth stages of spring maize in three north-eastern provinces of China

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究采用春玉米分布区内的站点，选取东北三省与产量波动有较强相关关系的时间尺度和月份的SPEI指数，研究其与相对气象产量的关系，拟合优度较用特定月份、特定尺度的SPI有较大提高[15]，尤其是黑龙江省决定系数R^2为0.2730，比用9月份6个月时间尺度SPI与相对气象产量的决定系数R^2（0.096）提高了0.1770。

从历史受灾率可以看出，辽宁省、吉林省和黑龙江省农作物既受旱也受涝，因旱受灾率普遍大于因涝受灾率。但在省级尺度上，辽宁省春玉米产量同时受旱涝影响，吉林省和黑龙江省主要因旱灾减产。这是因为吉林省和黑龙江省雨涝高发区主要为非玉米主产区，如吉林东部和黑龙江中、北部地区[22]，因此受雨涝影响较小。

气象指标的旱涝标准简单易用，但不能表征特定区域特定作物旱涝状况，只有综合区域、作物品种等特性后，才可用于农业旱涝灾害评估。本研究将东北春玉米不同生育阶段SPEI与相对气象产量回归分析，得到因旱涝减产的对应SPEI阈值范围，由于该阈值是旱涝发生规律、作物品种以及不同生育阶段对水分需求等多种因素共同作用的结果，因此认为可以用于该区域春玉米旱涝灾害的预测评估。

在该研究区，农作物受旱涝影响程度可用多时间尺度指数表征，但也存在一定的不确定性，尤其是涝灾。一方面，SPEI多基于月尺度及更长时间尺度数据计算得到，而涝灾是在短时间内即可发生并产生影响的灾害，过长时间尺度容易发生旱涝中和以及识别滞后的现象[31]；另一方面，三省因旱受灾率普遍大于因涝受灾率，春玉米主要受旱灾影响减产，极端湿润的年份和受灾范围相对较少，因涝受灾样本数量偏少使SPEI表征的雨涝与产量之间的关系更为模糊。

4.2 结论

本研究以东北三省为研究区，基于气象、统计等数据，用HP滤波、线性相关、距离相关、二次曲线拟合等方法，研究各省与春玉米产量波动有较强相关关系的时间尺度和月份的指数，分析其与春玉米产量波动的关系，主要取得的结论如下：

（1）SPI和SPEI均能表征东北地区受旱和受涝情况。二者相比，SPEI与因旱受灾率、因涝受灾率相关性更强，更能表征研究区的旱涝状况。因旱受灾率与各时间尺度SPEI、相对气象产量相关程度在辽宁省和吉林省相对较强，黑龙江省较弱，而因涝受灾率与各时间尺度SPEI的相关性在黑龙江省较强，吉林和辽宁两省稍弱。整体上，SPEI与因旱受灾率的相关性更强，与受涝情况相比，SPEI更能表征干旱。

（2）辽宁省$SPEI_3$-8与相对气象产量的距离相关系数最大，吉林省和黑龙江省相对气象产量最相关的指数是$SPEI_6$-8。三省SPEI与相对气象产量呈向下的抛物线趋势。三省相比，辽宁省因旱涝产生的产量变化更为剧烈。整体上，辽宁省洪涝灾害对产量的影响小于干旱，但不容忽视，轻旱或中度湿润以上可能导致减产10%以上；吉林、黑龙江两省因干旱造成的减产远大于雨涝，轻旱或极端湿润时可能导致减产10%以上。

（3）春玉米产量对旱涝的敏感性在不同生育阶段存在差异，各省区SPEI与相对气象产量在播种—出苗阶段回归分析均不显著，水分条件对春玉米产量的影响有限；在拔节—抽穗、抽穗—乳熟期均显著，春玉米对这两个生育时段的干湿状况更为敏感。辽宁省在拔节—抽穗期接近重度湿润时，玉米可达到最高产，该阶段主要对干旱影响敏感，生长季后期受洪涝灾害影响较前期加重，旱涝灾害对产量均有影响。吉林省在出苗—拔节、拔节—抽穗期当SPEI=1.0左右可达到最高产，抽穗—乳熟期受干旱影响严重。黑龙江省春玉米关键生育期主要受干旱影响，在出苗—拔

节、拔节—抽穗期正常偏湿年份可达到最高产量，但中度及以上雨涝会导致玉米减产，抽穗—乳熟期在轻度湿润时可实现高产，重度湿润时才会因涝减产。

本研究主要集中在省级空间尺度，以多站点均值代表区域总体干湿状况，分辨率较低。同时，作物种植结构调整以及不同时期历史记录的统计口径等可能发生变化，这些给研究结果带来一定的不确定性。后续研究中，可考虑将站点数据与遥感数据结合，综合二者优势，提高时空分辨率，并选取更合适的指数，将关键发展阶段和短时间尺度干旱指数相结合，以提升旱涝指数对产量变化趋势的预测精准度，并开展空间分析等。

参考文献：

[1] FONTES F, GORST A, PALMER C. Threshold effects of extreme weather events on cereal yields in India[J]. Climatic Change, 2021, 165: 1-2.

[2] Global Network Against Food Crisis. Global report on food crises 2020[R]. Brussels/Rome/New York: Food Security Information Network, 2020.

[3] 明博, 陶洪斌, 王璞. 基于标准化降水蒸散指数研究干旱对北京地区作物产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(5): 28-36.
MING B, TAO H, WANG P. Impact of drought on grain yield in Beijing investigated by SPEI-based methods[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(5): 28-36.

[4] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Eighth Conference on Applied Climatology. Boston, Massachusetts, USA: American Meteorological Society, 1993: 179-184.

[5] VICENTE S M, BEGUERIA S, LOPEZ J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[6] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. SPEI指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3787-3795.
SHEN G, ZHENG H, LEI Z. Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3787-3795.

[7] 高蓓, 姜彤, 苏布达, 等. 基于SPEI的1961—2012年东北地区干旱演变特征分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(6): 656-662.
GAO B, JIANG T, SU B. Evolution analysis on droughts in Northeast China during 1961—2012 based on SPEI[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(6): 656-662.

[8] 蔡思扬, 左德鹏, 徐宗学, 等. 基于SPEI干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 15-21.
CAI S, ZUO D, XU Z, et al. Spatiotemporal characteristics of drought in Northeast China based on SPEI[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 15-21.

[9] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. 基于SPEI指数的1961—2014年东北地区气象干旱时空特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5882-5893.
SHEN G, ZHENG H, LEI Z. Spatiotemporal analysis of meteorological drought (1961—2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5882-5893.

[10] 李明, 胡炜霞, 张莲芝, 等. 基于SPEI的东北地区气象干旱风险分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(7): 137-142.
LI M, HU W, ZHANG L, et al. Risk analysis of meteorological drought in Northeast China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(7): 137-142.

[11] YU X Y, HE X Y, ZHENG H F, et al. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over Northeast China[J]. Natural Hazards, 2014, 71(1): 275-289.

[12] NOORI S M S, LIAGHAT A M, EBRAHIMI K. Prediction of crop production using drought indices at different time scales and climatic factors to manage drought risk[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2011, 48: 1-9.

[13] MING B, GUO Y Q, TAO H B, et al. SPEIPM-based research on drought impact on maize yield in North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(4): 660-669.

[14] 高超, 尹周祥, 许莹. 淮河流域冬小麦主要生育期旱涝时空特征及对产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017 (22): 111-119.
GAO C, YIN Z, XU Y. Space-time characteristics of drought and flood in main growing periods of winter wheat in Huaihe River Basin and its impact on yield[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 103-111.

[15] 刘维, 李祎君, 何亮, 等. 基于SPI判定的东北春玉米

生长季干旱对产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 121-127.
LIU W, LI Y, HE L, et al. Effect of growing season drought on spring maize yields in Northeast China based on standardized precipitation index[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 121-127.
[16] 杨晓晨, 明博, 陶洪斌, 等. 中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 758-767.
YANG X, MING B, TAO H, et al. Spatial distribution characteristics and impact on spring maize yield of drought in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6): 758-767.
[17] 韩冬荟, 赵金媛, 胡琦, 等. 东北地区粮食作物产量变化特征及其对气象干旱的响应研究[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(3): 188-200.
HAN D, ZHAO J, HU Q. Analysis of crop yield variation characteristics in Northeast China and the response to meteorological drought[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(3): 188-200.
[18] 王米雪, 延军平, 李双双. 1960-2013年中国东南沿海地区旱涝时空变化特征及其趋势分析[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2307-2315.
WANG M, YAN J, LI S. Spatial temporal variation and the tendency of droughts and floods on the southeast coast of China over 54 Years[J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2307-2315.
[19] AYUGI B, TAN G, NIU R, et al. Evaluation of meteorological drought and flood scenarios over Kenya, East Africa[J]. Atmosphere, 2020, 11(3): 1-20.
[20] DU J, FANG J, XU W, et al. Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in Hunan province, China[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2013, 27(2): 377-387.
[21] 李秀芬, 郭昭滨, 朱海霞, 等. 黑龙江省大豆生长季旱涝时序特征及其对产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1223-1232.
LI X, GUO Z, ZHU H, et al. Time-series characteristics of drought and flood in spring soybean growing season and its effect on soybean yield in Heilongjiang province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1223-1232.
[22] 任宗悦, 刘晓静, 刘家福, 等. 近60年东北地区春玉米旱涝趋势演变研究[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(2): 179-190.
REN Z, LIU X, LIU J, et al. Evolution of drought and flood trend in the growth period of spring maize in Northeast China in the past 60 years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(2): 179-190.
[23] 王蕊, 张继权, 郭恩亮, 等. 近55 a吉林中西部玉米生长季旱涝时空特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 186-197.
WANG R, ZHANG J, GUO E, et al. Spatiotemporal characteristics of drought and waterlogging during maize growing season in midwestern Jilin province for recent 55 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(1): 186-197.
[24] ZHANG Q, YU H, SUN P, et al. Multisource data based agricultural drought monitoring and agricultural loss in China[J]. Global and planetary change, 2019, 172(JAN.): 298-306.
[25] LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA-ROBERTS J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. Science, 2011, 333(6042): 616-620.
[26] POTOPOVÁ V, BORONEANŢ C, BOINCEAN B, et al. Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova[J]. International Journal of Climatology, 2015, 36(4): 2063-2082.
[27] WU H, HUBBARD K G, WILHITE D A. An agricultural drought risk-assessment model for corn and soybeans[J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(6): 723-741.
[28] 王桂芝, 陆金帅, 陈克垚, 等. 基于HP滤波的气候产量分离方法探讨[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 195-199.
WANG G, LU J, CHEN K, et al. Exploration of method in separating climatic output based on HP Filter[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2): 195-199.
[29] FINLEY A O, MCROBERTS R E. Efficient *k*-nearest neighbor searches for multi-source forest attribute mapping[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2203-2211.
[30] 王黎明, 吴香华, 赵天良, 等. 基于距离相关系数和支持向量机回归的PM2.5浓度滚动统计预报方案[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1268-1276.
WANG L, WU X, ZHAO T, et al. 2017. A scheme for rolling statistical forecasting of PM2.5 concentrations based on distance correlation coefficient and support vector regression[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(4): 1268-1276.
[31] 高雅文, 邓可楠, 张月, 等. 基于农业旱涝指标的湖北省棉花生育期内旱涝急转特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 101-110.
GAO Y, DENG K, ZHANG Y, et al. Using agro-meteorological indexes to analyze variation in abrupt drought-flooding Alternation during cotton growth season in Hubei province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 101-110.

Effect of Growing Season Drought and Flood on Yield of Spring Maize in Three Northeast Provinces of China

WANG Weidan[1,2], SUN Li[1,2], PEI Zhiyuan[1,2], MA Shangjie[1,2], CHEN Yuanyuan[1,2], SUN Juanying[1,2], DONG Mo[1,2]

（1. *Key Laboratory of Cultivated Land Use*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100121, *China*;
2. *Academy of Agricultural Planning & Engineering*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100121, *China*）

Abstract: With the change of global climate, extreme weather events such as drought and flood disasters occur frequently. These have a great impact on crop yields. As an important main grain producing area, the impact of drought and flood on the agricultural production of the three provinces in three northeast provinces of China cannot be ignored. Based on historic meteorological data such as daily precipitation, maximum temperature, minimum temperature, 2 m average wind speed, sunshine hours and relative humidity, etc., the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) during 1988—2017 in three northeast provinces of China were calculated with different time scales. Through comparing with characterization of drought and flood disasters in history, SPEI was chosen to judge drought and flood in the growth season of spring maize. With the purpose of evaluating the effects of drought and flood on spring maize yield, based on the distance correlation analysis method, the index of reasonable time scale and key month were selected to analyze the relationship between the index and the relative meteorological yield of spring maize. The relationship between water conditions at different growth stages and the yield was also analyzed. The results showed that: (1) both SPI and SPEI could represent the drought and flood conditions in three northeast provinces of China. Compared with SPI, SPEI had higher correlation with the drought and flood disaster rate, and SPEI was more advantageous in characterizing the drought and flood conditions in the study area; (2) relative meteorological yield was significantly correlated with drought disaster rate in all three provinces ($P<0.01$), and reached 0.05 significant level with flood disaster rate in Liaoning province, but not significant in Jilin and Heilongjiang province; (3) the distance correlation coefficient between $SPEI_3$-8 and relative meteorological in Liaoning province was the largest, and that between $SPEI_6$-8 and relative meteorological yield in Jilin and Heilongjiang province was the largest. SPEI and relative meteorological yield showed a downward parabolic trend. Overall, the impact of waterlogging on the yield in Liaoning was slightly less than that of drought, mild drought or moderate wet could lead to a decrease in yield. The impact of drought disaster in Jilin and Heilongjiang was much greater than that of flood, but severe humidity could lead to a decrease in yield. Compared with other provinces, the maize yield in Liaoning province fluctuated more sharply with the change of dry and wet; (4) in Liaoning province, maize may reach the highest yield when the jointing-heading period was close to severe wet, which was mainly affected by drought. In the late growing season, the impact of flood disasters was more severe than that of the early growing season, and both drought and flood disasters had effects on the yield. In Jilin province, the highest yield of spring maize was reached when SPEI was about 1.0 during the period of emergence-jointing and jointing-heading, and the effect of drought was more serious during the period heading-milking. The key growth periods in Heilongjiang province were mainly affected by drought, and the maximum yield was reached in the normal-wet years of emergence-jointing and jointing-heading stages, but medium-scale size or more severe floods still led to the decrease of maize yield. The high yield could be achieved in the slightly wet years in period of heading-milking stage, while the decrease could be caused by flood when it was severely wet. This research can provide a reference for estimating the impact of drought and flood disasters on spring maize and taking disaster prevention measures in three northeast provinces of China.

Key words: drought; flood; standardized precipitation evapotranspiration index; yield; spring maize; three northeast provinces of China